DISEÑO DE PAVIMENTOS SUELO-CEMENTO

Método de la Portland Cement Association (PCA)

Introducción

El procedimiento de diseño de la PCA esta basado en información obtenida de diferentes fuentes, incluyendo investigaciones, desarrollos teóricos, ensayos de pavimentos a escala real, y el monitoreo de la performance de pavimentos en servicio. Un programa de investigación llevado a cabo por la Portland Cement Association correlacionó la información de diseño de estas fuentes obteniendo como resultado un procedimiento desarrollado únicamente para pavimentos suelo-cemento.

Bases para el Procedimiento de Diseño de Espesores

Desde 1935 más de 140,000 km de pavimentos suelo-cemento han sido construidos en Norteamérica. La performance demostrada por estos pavimentos a través de los años provee una valiosa información para el diseño, para los niveles de espesor que fueron utilizados. La mayoría de estos pavimentos en servicio son de 15 cm de espesor. Este espesor ha probado ser satisfactorio para las condiciones de servicio de caminos secundarios, calles residenciales y pistas de aterrizaje de tráfico ligero. Algunos pavimentos de 10 cm y 12.5 cm han sido construidos y han dado un buen servicio bajo condiciones favorables de tráfico ligero y fuerte resistencia del suelo. Muchos kilómetros de pavimentos de 17.5 cm y 20 cm de espesor están en servicio en caminos principales y vías secundarias de alto tráfico. Pavimentos con suelo-cemento con espesores de 22.5 cm o mas no son numerosos, aunque algunos proyectos de aeropuertos han sido construidos con espesores de hasta 40 cm. En carreteras interestatales en algunas áreas de tráfico comparativamente más bajos, un amplio rango de espesores de suelo-cemento, de 10 a 30 cm, han sido incorporados en la estructura total de los pavimentos. Se ha obtenido también información valiosa de diseño de ensayos de caminos a escala real y de investigaciones de laboratorio conducidas por universidades, departamentos de carreteras, y por la Portland Cement Association.

Propiedades Estructurales Básicas

Las propiedades estructurales del suelo-cemento dependen del tipo de suelo, condiciones de curado, y edad. Los rangos típicos para una amplia variedad de tipos de suelo-cemento, a sus respectivos contenidos de cemento requeridos para durabilidad, son:

Propiedad	***Valores a 28 días***
Resistencia a la compresión, saturada	400 - 900 psi
Módulo de ruptura	80 - 180 psi
Módulo de elasticidad (módulo estático a la flexión)	600,000 - 2'000,000 psi
Relación de Poisson	0.12 – 0.14[1]
Radio de curvatura crítico[2], en viga de 6 x 6 x 30 pulg.	4,000 – 7,500 pulg.

[1] La Relación de Poisson puede ser bastante variable, dependiendo en el método de ensayo y otras condiciones. Los valores mostrados están basados en resultados de ensayos triaxiales,

A lo largo de la vida de diseño de un pavimento de suelo-cemento la resistencia promedio será considerablemente mayor que los valores para 28 días. La Figura 1 muestra la ganancia de resistencia de laboratorio para 5 años, para diferentes tipos de suelo-cemento y la Figura 2 muestra el incremento de la resistencia con muestras de campo, para cuatro proyectos para varios periodos de tiempo. Este incremento de la resistencia provee un margen de seguridad en el procedimiento de diseño del espesor.

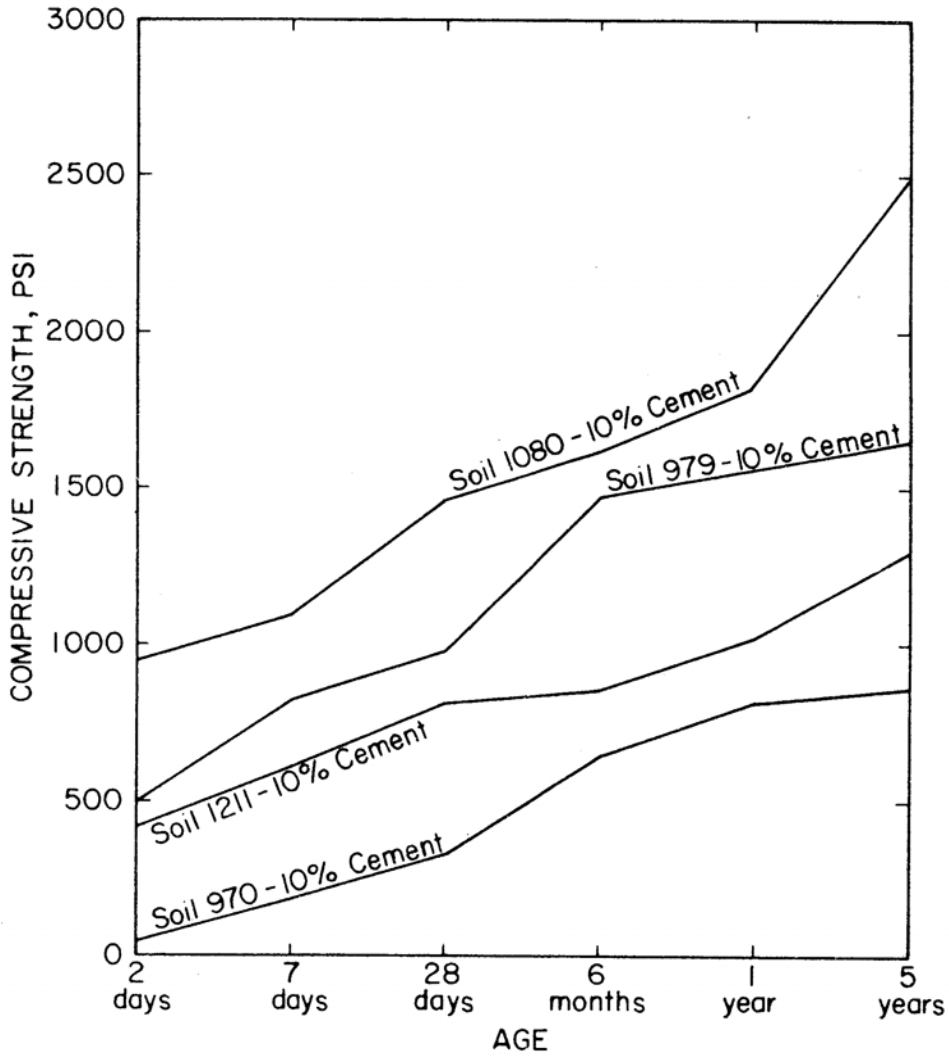

Figura 1. Incremento de la resistencia con la edad, especimenes de laboratorio

Características carga-deflexión

La investigación carga-deflexión en pavimentos suelo-cemento mostró que fue posible describir la respuesta por medio de una simple ecuación, a pesar del tipo de suelo y contenido de cemento, tanto como el producto cumple los requisitos para suelo-cemento totalmente endurecido[3].

[2] El radio de curvatura crítico es el radio para el cual una viga falla debido a una aplicación de carga simple. Es una medida de la resistencia a la flexión y puede ser comparada con la deformación unitaria última.

[3] Ver “Requerimientos de Calidad para Suelo-Cemento”.

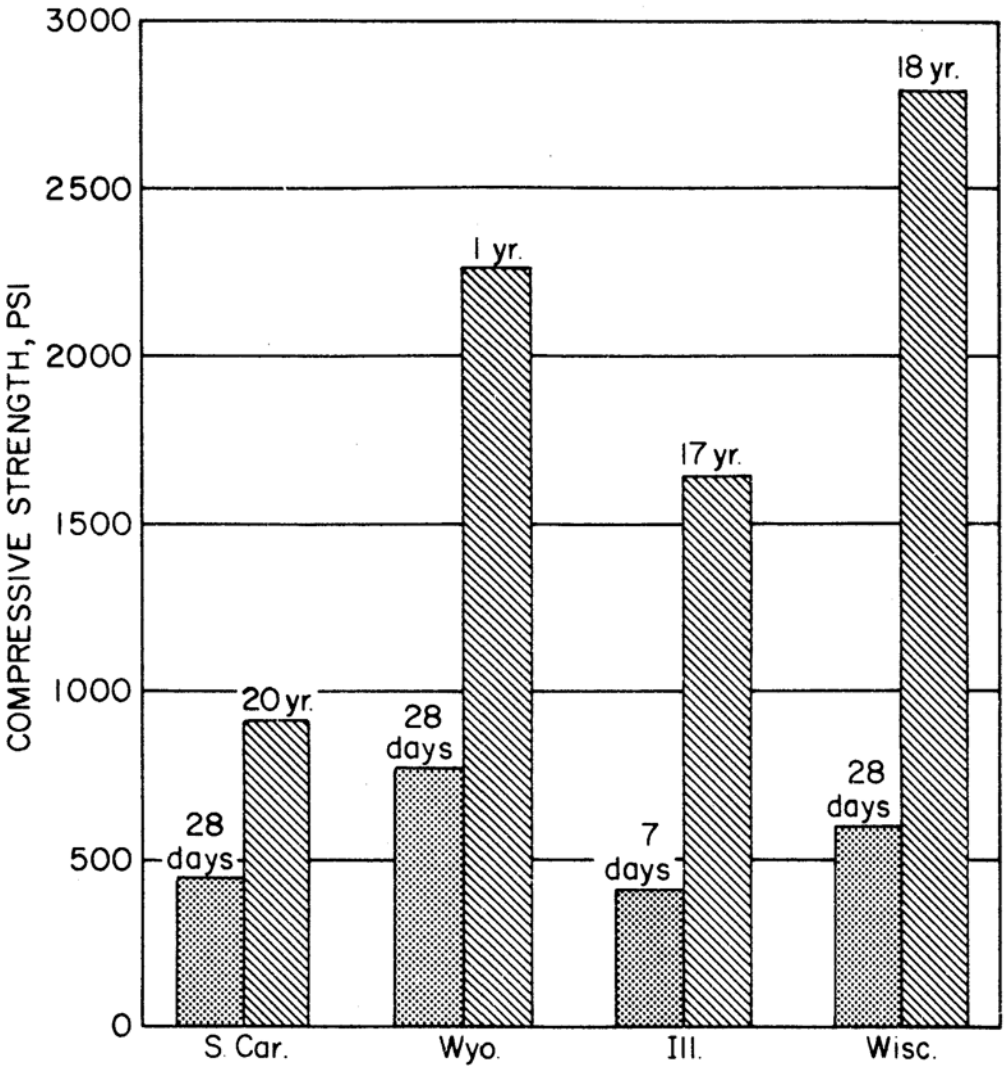

Figura 2. Incremento de la resistencia con la edad, proyectos en servicio.

Esta investigación también demostró que la resistencia del pavimento es evaluada más exactamente por el grado de flexión antes que por las medidas de deflexión solamente. Por esta razón, el radio de curvatura en lugar que la deflexión fue empleado como factor principal en el desarrollo de las formulaciones de diseño.

Propiedades de Fatiga

Los estudios de fatiga revelaron que, para un diseño dado, el número de repeticiones de carga hasta la falla estuvo relacionado con el radio de curvatura a la flexión. Esta correlación probó ser similar al conocido comportamiento a la fatiga de otros materiales.

El efecto del tipo de suelo fue significativo en los resultados a la fatiga. Se requirió la división de los suelos en dos amplios tipos de textura, suelos de gradación granular y suelos de gradación fina, y el correspondiente empleo de cartas de diseño por separado para las respectivas mezclas de suelo-cemento. Como se muestra en la Tabla 1, los dos tipos pueden ser diferenciados por los grupos de suelos del sistema de clasificación del la American Association of State Highway and Transportation Officials, como sigue:

1. Suelos granulares – Grupos A-1, A-3, A-2-4, y A-2-5
2. Suelos de gradación fina – Grupos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5, A-6, y A-7.

En un posterior desarrollo del procedimiento de diseño, la deflexión, radios de curvatura, y funciones de fatiga fueron combinados. Ensayos de carga adicionales fueron efectuados para evaluar y establecer los parámetros para la función combinada. Este trabajo analítico se describe en el Boletín D142 del Departamento de Desarrollo de la Portland Cement Association (PCA).

Tabla 1. Sistema de Clasificación AASHTO dividido para el procedimiento de diseño para Suelo-Cemento

General classification	Granular materials (35 percent or less passing No. 200)							Silt-clay materials (more than 35 percent passing No. 200)			
Group classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6
Sieve analysis, percent passing:											
No. 10	50 max.										
No. 40	30 max.	50 max.	51 min.								
No. 200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Characteristics of fraction passing No. 40:											
Liquid limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Textural type for soil-cement thickness design procedure	Granular soils							Fine-grained soils			

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Los factores analizados para determinar el espesor de diseño son:

1. Resistencia del suelo.
2. Periodo de diseño del pavimento.
3. Trafico, incluyendo volumen y distribución de pesos por eje (configuración de cargas de ejes simple y tándem, de camiones convencionales).
4. Espesor de la capa de base suelo-cemento.
5. Espesor de la capa bituminosa superficial.

Resistencia del suelo

El soporte proporcionado por el suelo al pavimento de suelo-cemento es el elemento más importante en el procedimiento de diseño. El soporte del suelo es medido en términos del módulo de Westergaard de reacción del suelo *k*, el cuál se determina mediante ensayos de placa sobre el terreno. El procedimiento para la medición en campo de los valores de k esta dado en el Manual Técnico del Ejercito TM5-824-3. En caso que no este disponible el equipo para la determinación del valor-k mediante el ensayo de placa, las relaciones aproximadas listadas en la Tabla 2 pueden ser utilizadas a modo de guía; ellas están basadas en ensayos de laboratorio sobre tipos generales de suelos. Desde que estas relaciones son aproximadas y frecuentemente influenciadas por variaciones en los métodos de ensayos, podran ser modificadas de acuerdo a la práctica local.

Suelos muy blandos que tengan valores de resistencia significativamente menores que los valores de soporte mostrados en la Tabla 2, no serán capaces de soportar el equipo necesario para alcanzar una adecuada compactación del suelo-cemento. Estos suelos deberán ser mejorados mediante diversos métodos descritos en el Manual de Construcción de Suelo-Cemento de la PCA.

Tabla 2. Relaciones entre Tipos de Suelos y Valores de Soporte

Tipo de Suelo	Resistencia del Suelo	Rango de CBR* (%)	Rango del Valor R**	Rango del Módulo k (lb/pulg3)
Suelos de grano fino en los cuales predominan los tamaños de partículas de limo y arcilla	Baja	3 a 6	8 a 27	100-150
Arenas pobremente graduadas y suelos que son predominantemente arenosos con cantidades moderadas de limo y arcilla	Media	6 a 10	27 a 45	150-200
Suelos gravosos, arenas bien graduadas, y mezclas de arenas y gravas, relativamente libres de finos plásticos	Alta	Mas de 10	50 o mas	200 o mas

* California Bearing Ratio
** Valor de Resistencia determinado con Estabilómetro

Periodo de Diseño

El periodo de diseño seleccionado convencionalmente por el procedimiento es de 20 años. Sin embargo este valor no hay que confundirlo con la vida de servicio de los pavimentos con suelo-cemento. Proyectos que han sido construidos a mediados y finales de 1930's muestran que sus vidas útiles no han sido excedidas, y que las capas de suelo-cemento aún siguen funcionando como principal elemento que soporta las cargas.

Debido a que la selección del periodo de diseño es algo arbitrario y que la formulación del diseño no es particularmente sensible a las variaciones en el periodo de diseño, el diseñador puede seleccionar un valor diferente de este y proporcionar el volumen total de tráfico en forma concordante.

Tráfico

Los pesos y volúmenes de las cargas por eje esperados durante el periodo de diseño son los factores más importantes en la determinación del espesor de diseño. El análisis de tráfico usado en este procedimiento incluye:

a) Determinación del tráfico promedio diario en ambas direcciones (TPD) y los porcentajes de camiones.
b) Proyección del tráfico al futuro periodo de diseño.
c) Determinación de la distribución probable eje-carga.
d) Cálculo del Factor de Fatiga.

Sin embargo, cualquier otro método[4] que proporcione una razonable estimación de estos factores de tráfico pueden ser empleados.

TPD y Porcentaje de Camiones

El tráfico promedio diario en ambas direcciones y el porcentaje de camiones[5] puede ser obtenido directamente de una encuesta del tráfico del proyecto, o de datos que pueda estar disponible en el Departamento de Transportes o Municipalidad, para el proyecto específico o para otros proyectos que tienen un tráfico similar[6].

Si se efectúan conteos de tráfico de 24 horas, estos son efectuados durante uno o más días entre Lunes y Viernes. Los conteos de 24 horas son ajustados a valores promedio diarios. Como una guía para efectuar estos ajustes puede consultarse la sección de planificación de encuestas del Departamento de Carreteras[7].

Proyección del Tráfico

Las tasas de crecimiento del tráfico y los factores de proyección correspondientes son empleados para estimar el Trafico Promedio Diario (TPD) de diseño y el número de camiones que emplearán el pavimento durante el periodo de diseño. Las secciones de planificación de encuestas de los departamentos estatales de carreteras son fuentes muy útiles para conocer el crecimiento del tráfico y los factores de proyección. Los ingenieros determinan estos factores para proyectos de carreteras estatales y, en algunos casos, para caminos locales y calles, y otros proyectos dentro de sus estados.

La Tabla 3 muestra las relaciones entre las tasas anuales de crecimiento y los factores de proyección de 20 años[8]. El crecimiento del tráfico anual varía de 2 a 6 por ciento, siendo los valores más bajos más aplicables a los tipos de caminos y calles donde se emplea comúnmente el suelo-cemento. Las tasas de crecimiento mas altas son para carreteras urbanas y entre ciudades.

Para caminos rurales secundarios rurales de dos carriles y calles residenciales donde la función principal es el uso de la tierra o el servicio de propiedad contiguo, las tasas de crecimiento de tráfico pueden ser bastante mas bajas que 2 por ciento.

---

[4] Los métodos para la estimación del tráfico para la capacidad de diseño están dados en el Apéndice A. La capacidad de diseño, usado en forma poco frecuente para proyectos de suelo-cemento, puede ser algunas veces apropiado para situaciones de volúmenes de tráfico pesados. Otros métodos para la estimación del tráfico se dan en la publicación de la PCA, *Thickness Design for Concrete Pavements*.

[5] En este procedimiento el porcentaje de camiones incluye todos los vehículos tipo panel, camionetas y otros vehículos comerciales de dos ejes y cuatro llantas, adicionalmente a los camiones con tres o más ejes.

[6] Los Departamentos Estatales de Carreteras efectúan encuestas de tráfico anualmente, en las mismas ubicaciones del sistema estatal de carreteras. Los resultados de estas encuestas son compiladas en juegos de tablas codificadas como W-1 a W-8. Los datos están resumidos para las siguientes clases de carreteras: Interestatal rural, otras rurales principales, todas las rurales principales, interestatal urbana, otras urbanas y, en algunos estados, rurales locales. Los usos de estas encuestas y los métodos computacionales para análisis de trafico para estas clases de carreteras y autopistas urbanas son discutidas en el documento *"Thickness Design for Concrete Pavements"*.

[7] Datos recientes en las encuestas anuales de dos estados del medio-oeste muestran que el TPD variaron de 78 a 96 por ciento de los conteos de clasificación de 24 horas.

[8] Para otros periodos de diseño pueden calcularse los factores de proyección mas apropiados mediante formulas de interés compuesto o, si las tasas de crecimiento nos son grandes, estos pueden estimarse.

Para calles residenciales y calles colectoras de tráfico ligero, el crecimiento del tráfico no es significativo como para afectar el espesor de diseño.

Tabla 3. Tasas anuales de crecimiento de tráfico y factores de proyección correspondientes

Tasa anual de crecimiento de tráfico (%)	Factor de proyección para un periodo de diseño de 20 años
1	1.1
1 ½	1.1
2	1.2
2 ½	1.3
3	1.4
3 ½	1.5
4	1.5
4 ½	1.6
5	1.7
5 ½	1.8
6	1.9

Para calles y caminos de mediano a alto tráfico, debe efectuarse la verificación de la capacidad de diseño de las vías para asegurar que se cuenta con el número suficiente de carriles para el tráfico proyectado. La Tabla 4 puede emplearse para una verificación gruesa. En el Apéndice A se dan los métodos para el diseño para capacidad de tráfico.

Tabla 4. Guía para capacidad de carreteras

	Capacidad – Volumen diario promedio de automóviles y camiones (dos direcciones)[9]		
Vehículos Comerciales (%)	**Carreteras rurales de 2 carriles**	**Carreteras rurales de 4 carriles**	**Carreteras urbanas de 4 carriles**
0	5,740	19,250	37,500
10	5,200	17,500	34,000
20	4,800	16,050	31,000

Distribución de cargas por eje

La información sobre la distribución de cargas por eje para el tráfico de camiones es necesaria para calcular los números de ejes simples y tándem de los diversos pesos esperados durante el periodo de diseño. Estos datos se emplean después para el cálculo del Factor de Fatiga, el cuál expresa los efectos de fatiga producidos por el número y pesos de las cargas por eje.

Datos de encuestas de cargas disponibles (Caminos rurales y calles urbanas)

[9] Los métodos para la estimación del tráfico para el diseño de la capacidad se presentan en el Apéndice A. El diseño de la capacidad que no muy frecuentemente se emplea para los proyectos de suelo-cemento, puede ser apropiado algunas veces para situaciones de volumen de tráfico pesado. Otros métodos para la estimación del tráfico se dan en la publicación del PCA *"Thickness Design for Concrete Pavements"*.

La distribución de cargas por eje se calcula con datos de uno o más estaciones de pesaje o de las tablas W-4 para las clases apropiadas de caminos o calles. Recientemente algunos departamentos estatales de carreteras han efectuado encuestas de cargas para calles de ciudades y caminos de condados. Minnesota, por ejemplo, ha preparado tablas W-4 "L" las cuales muestran la distribución de cargas por eje para el tráfico que es predominantemente local. California ha efectuado encuestas similares para calles que conducen moderados a altos volúmenes de tráfico.

El procedimiento para el uso de una tabla W-4 para un camino local se da en el Ejemplo de Diseño 1. Una tabla W-4 con los datos esenciales para el ejemplo se reproduce en la Tabla 8 y los cálculos respectivos en la Tabla 9.

Para el diseño de calles de ciudades, muchas comunidades han efectuado estudios de tráfico basados en un sistema de clasificación práctica de calles. Estos estudios indican que las calles de similar clasificación conducen esencialmente la misma distribución de cargas por eje.

Datos de encuestas de cargas no disponibles (Calles residenciales y caminos secundarios)

En muchos casos no se disponen de datos de distribución de cargas por eje para la categoría de pavimentos con tráfico ligero, por ejemplo, para calles residenciales o caminos secundarios. En la ausencia de estos datos, pueden emplearse los valores listados en la Tabla 5 para representar los requerimientos de fatiga para el diseño de un pavimento con suelo-cemento, los que se conocen que dan espesores de diseño bastante razonables.

Tabla 5. Factores de Fatiga representativos para pavimentos de tráfico ligero

Facilidad	TPD	Total de camiones* (%) Aprox.	Camiones pesados** (%) Aprox.	Factor de Fatiga***
Calles puramente residencial……..	300 a 700	8	3	5 a 12
Calles colectoras residenciales….	700 a 4,000	8	3	12 a 20
Caminos secundarios……	Hasta 2,000+	14 a 20	5 a 8	12 a 30

* Todos los vehículos comerciales, incluyendo los vehículos de 2 ejes y 4 llantas.

** Excluye a las paneles, camionetas, y otros vehículos de 2 ejes y 4 llantas que con lo suficientemente pesados para afectar el espesor de diseño.

*** Estos rangos particulares de valores para el Factor de Fatiga están basados en los siguientes características para el tráfico de las calles y caminos secundarios: (1) la mitad del numero indicado de cargas pesadas por eje, por dirección; (2) las distribuciones de cargas por ejes varían de 12,000 a 20,000 libras por eje individual; (3) los promedios ponderados de cargas por eje varían entre 13,000 y 16,000 libras por eje individual.

Para calles residenciales, los estudios de tráfico indican que los volúmenes de tráfico pueden variar como se muestra en la Tabla 5, con cerca de 3 por ciento de camiones lo suficientemente pesados para afectar el espesor de diseño (cargas por eje de 12,000 libras o más). Para caminos secundarios, los volúmenes de tráfico pueden oscilar desde valores muy bajos hasta un TPD de 2,000 o mas, con alrededor de 5 a 8 por ciento de camiones con peso suficiente para afectar el diseño.

Los Factores de Fatiga correspondientes en la Tabla 5 representan a estos volúmenes de camiones con rangos en el distribución de cargas por eje que son típicos para calles y vías secundarias.

Para caminos por donde transcurren inusualmente cargas pesadas por eje tales como camiones de minería o forestales, es necesario obtener la distribución de cargas por eje en forma especifica y luego determinar el Factor de Fatiga requerido.

Distribución por carril

Para proyectos de 4 carriles, así como de 2 carriles, se asume que todos los carriles conducen al 100 por ciento del tráfico de camiones en una dirección. Un análisis mas detallado para proyectos de 4 carriles puede emplearse para encontrar el porcentaje de camiones en el carril del lado derecho; sin embargo, este análisis usualmente no cambiará significativamente el espesor de diseño para un proyecto específico.

Factor de Fatiga

Este procedimiento de diseño denomina como "Factor de Fatiga" al valor individual que expresa los efectos del consumo total de fatiga, producido por los volúmenes y pesos de cargas de ejes simples y tándem, para un problema de diseño dado. Este factor se basa en coeficientes que muestran el consumo relativo de fatiga de las diferentes magnitudes de cargas por eje, denominados "Coeficientes de Consumo de Fatiga", los cuales se listan en la Tabla 6[10]. El diseñador deberá notar que se emplean valores diferentes para suelo-cemento granular y suelo-cemento de graduación fina, en correspondencia con los dos tipos generales de suelos (ver Tabla 1).

Los Coeficientes de Consumo de Fatiga son multiplicados por los números (en miles) de ejes de cada intervalo de carga y luego sumados para dar un valor simple de Factor de Fatiga, como se ilustra en la Tabla 10 para el Ejemplo de Diseño 1.

Espesor de Suelo-Cemento

El espesor de la capa de base de suelo-cemento se determina empleando la Figura 3 para suelo-cemento granular, o la Figura 4 para suelo-cemento de graduación fina. El espesor de suelo-cemento se lee con una aproximación de un décimo (0.1) de pulgada empleando el Factor de Fatiga calculado y el valor de diseño del Coeficiente de Reacción k. Este espesor usualmente se incrementa a la ½ pulgada superior a menos que haya un ajuste por el espesor de la capa bituminosa, como se explica en la siguiente sección.

Espesor de la capa de superficie bituminosa

El espesor de la capa bituminosa de superficie dependerá de muchos factores: el tipo de superficie, el volumen y composición del tráfico, las condiciones climáticas, la disponibilidad de materiales, y las prácticas locales. La Tabla 7 esta basada en la experiencia cubriendo un amplio rango de estas variables y muestra el espesor de superficie recomendado como una buena práctica de diseño. Bajo condiciones favorables indicadas por experiencias locales previas, o cuando se espera que las superficies serán selladas y posiblemente recapadas en un lapso relativamente

[10] Las bases para el cálculo de los Coeficientes de Consumo de Fatiga y el Factor de Fatiga se presenta en el Apéndice B.

corto, debería esperarse que los espesores mínimos mostrados en la Tabla 7 serán adecuados.

Tabla 6. Coeficientes de Consumo de Fatiga*

Carga por Eje (Miles de libras)	Suelo-Cemento Granular	Suelo-Cemento Gradación Fina
Ejes Simples		
30	12,500,000.	3,530.
28	1,270,000.	1,130.
26	113,000.	337.
24	8,650.	93.
22	544.	23.3
20	27.	5.2
18	1.0000	1.0000
16	0.0250	0.1600
14	0.0004	0.0200
12	0.0000	0.0018
Ejes Tándem		
50	12,500,000.	3,530.
48	3,210,000.	1,790.
46	792,000.	890.
44	186,000.	431.
42	41,400.	203.
40	8,650.	93.
38	1,690.	41.1
36	305.	17.5
34	50.4	7.1
32	7.5	2.74
30	1.0000	1.0000
28	0.1200	0.3410
26	0.0120	0.1070
24	0.0010	0.0310
22	0.0000	0.0081
20	0.0000	0.0018

* Estos coeficientes expresan el consumo relativo de fatiga de las diferentes magnitudes de cargas por eje y son derivados de las Ecuaciones 25 y 25a para suelo-cemento granular y suelo-cemento de graduación fina, respectivamente, en el Boletín D142 del Departamento de Desarrollo de la PCA. Las bases para los cálculos se presentan en el Apéndice B.

Las investigaciones han indicado que espesores de superficie bituminosa por debajo de 2 pulgadas (5 cm) no suman en forma apreciable a la capacidad estructural del pavimento con suelo-cemento. Sin embargo, es lógico asumir que superficies más gruesas contribuirán en algo con la capacidad estructural. Aunque una evaluación más precisa sobre el beneficio estructural de capas de superficies gruesas debe esperar los resultados de nuevas investigaciones y experiencias de la performance, se puede efectuar una estimación estructural empleando la Figura 5, la cuál se basa en la capacidad de distribución de carga de la capa de superficie[11].

[11] La Figura 5 fue elaborada empleando un valor promedio de $(a + t)^{½}$ en lugar de $a^{½}$ en las ecuaciones de diseño del Boletín D142 del Departamento de Desarrollo de la PCA, donde "a" es el radio de contacto, calculado a 6, 8 y 10 pulgadas, y "t" es el espesor de la superficie bituminosa.

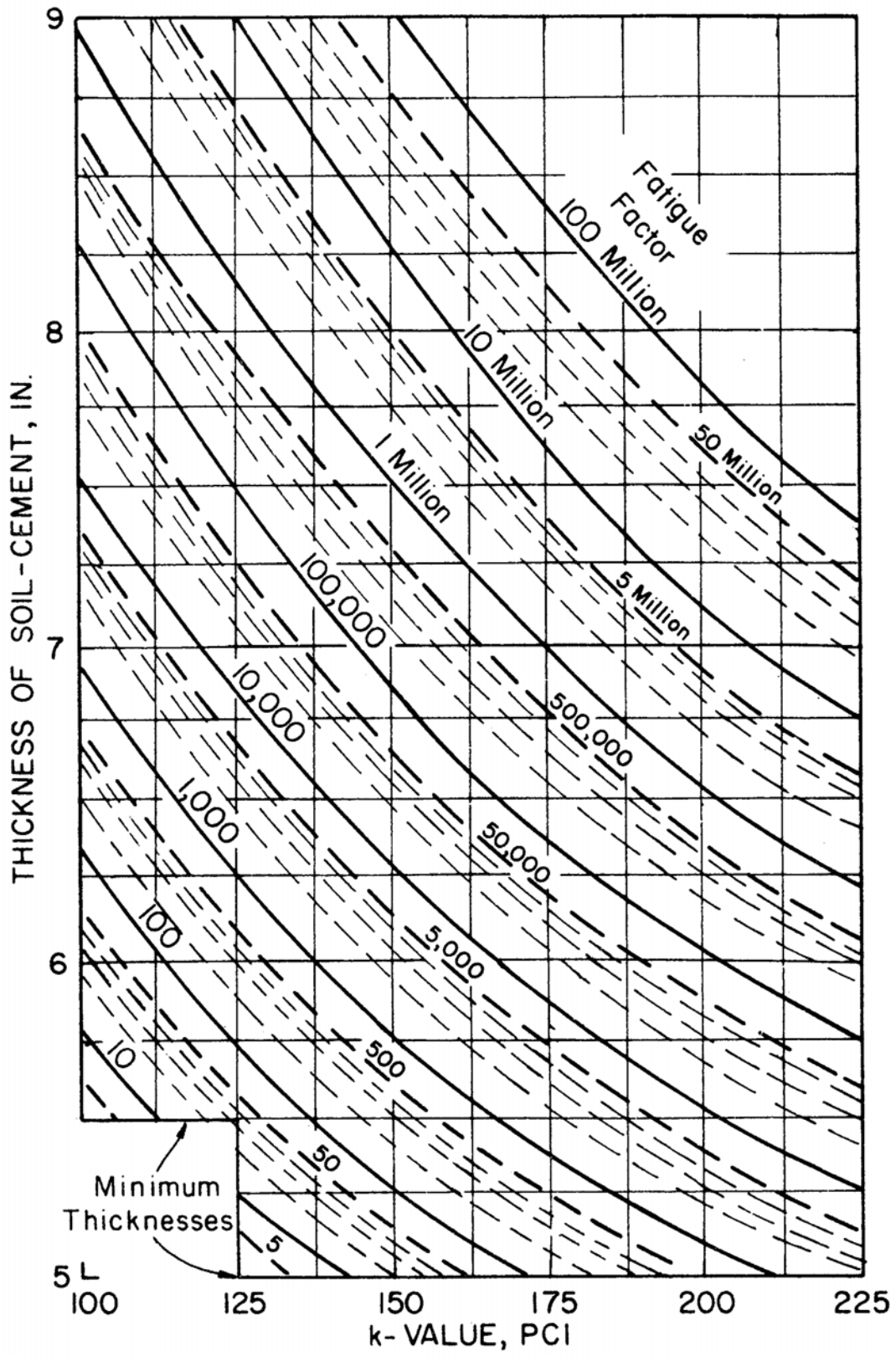

Figura 3. Carta para diseño de espesores para suelo-cemento granular.

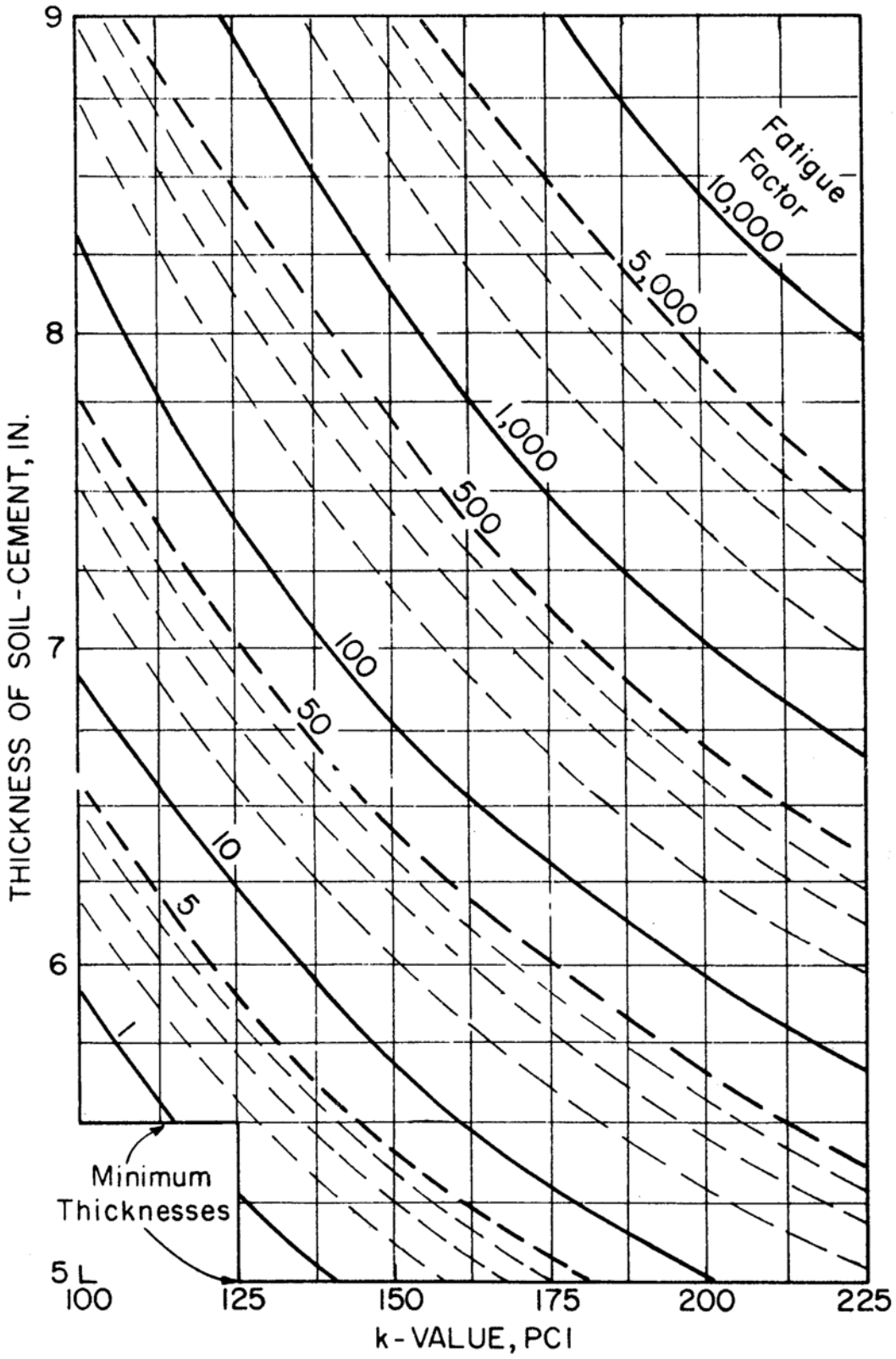

Figura 4. Carta para diseño de espesores para suelo-cemento gradación fina.

Tabla 7. Espesores de Superficie Bituminosa

Espesor de Suelo-Cemento (pulg.)	Espesor de Superficie Bituminosa Recomendado (pulg.)	Espesor Mínimo de Superficie Bituminosa (pulg.)	
		Área sin congelamiento	Área con congelamiento
5 – 6	¾ – 1 ½	SBST*	DBST*
7	1 ½ – 2	DBST	1**
8	1 ½ – 2 ½	1	1 ½
9	2 - 3	2	2

* SBST, Tratamiento superficial bituminoso simple; DBST, Tratamiento superficial bituminoso doble.

** Donde se emplee quitanieves se recomienda un mínimo de 1 ½ pulgada.

Por ejemplo, si la Figura 3 indica un espesor básico de suelo-cemento de 7.8 pulgadas, y es una práctica local colocar 3 pulgadas de superficie, la Figura 5 muestra que el espesor de diseño de suelo-cemento puede reducirse a 6.7 pulgadas. Este debería usualmente redondearse a la ½ pulgada superior, por ejemplo, 7 pulgadas de suelo-cemento con 3 pulgadas de capa bituminosa de superficie.

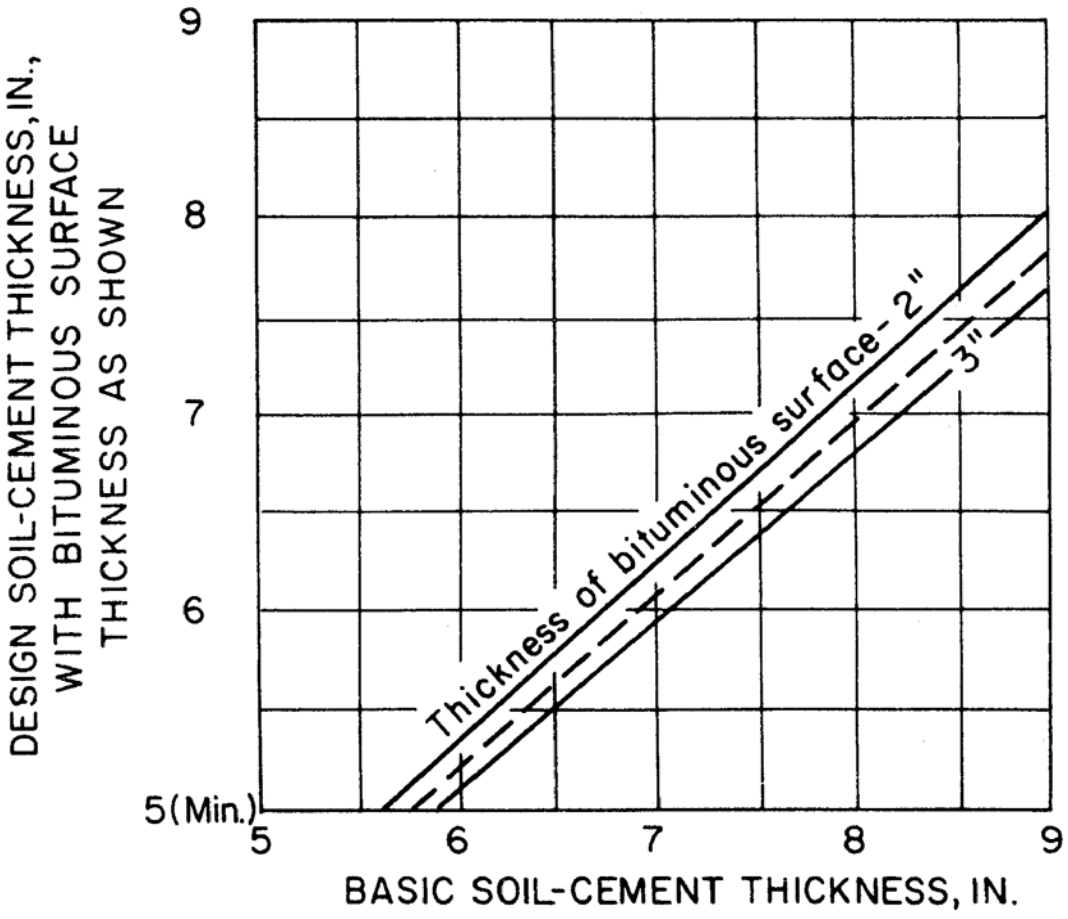

Figura 5. Carta de Diseño para reducción del espesor de suelo-cemento considerando el espesor de la superficie bituminosa

EJEMPLO DE DISEÑO

EJEMPLO 1

Proyecto y Datos de Tráfico

Camino local de 2 carriles (Tabla W-4 disponible, Tabla 8)
Suelo-Cemento granular
Suelo de fundación débil, k = 125 lb./pulg^3
Periodo de diseño = 20 años
TPD actual = 1,046
Factor de proyección = 1.5
Tráfico de Camiones[12] = 16 por ciento del TPD

Cálculos del Tráfico

TPD de diseño = 1,046 x 1.5 = 1,569
Tráfico de Camiones = 1,569 x 0.16 = 251

- ► Cada carril : 251/2 = 126
- ► Para el periodo de diseño : 126 x 365 x 20 = 919,800

En la Tabla 9, se calcula el número esperado de cargas por eje multiplicando 919,800 camiones por las cargas por eje para 1,000 vehículos dadas en la Tabla W-4, y Tabla 8.

La Tabla 10 muestra el cálculo del Factor de Fatiga. Empezando con las categorias de cargas mas pesadas, se observa que los efectos de fatiga disminuyen rápidamente cuando las cargas decrecen. Esto usualmente hace innecesario emplear las categorias de cargas bajas en los cálculos. El Total es redondeado para obtener el Factor de Fatiga de 268,000.

Espesor de Diseño

Como se mostró en la Figura 3, el espesor básico de suelo-cemento requerido para un valor-k de 125 lb./pulg3 y un Factor de Fatiga de 268,000 es 7.7 pulgadas. La Tabla 7 proporciona el correspondiente espesor de superficie bituminosa, igual a 2 pulg.

La Figura 5 muestra que, con 2 pulgadas de superficie bituminosa, el espesor de suelo-cemento puede reducirse a 6.9 pulgadas. Así un base de suelo-cemento de 7 pulgadas de espesor con una superficie asfáltica de 2 pulgadas puede ser un diseño práctico y económico para este proyecto.

EJEMPLO 2

Proyecto y Datos de Tráfico

Calle residencial (no hay disponible datos de encuesta de cargas)
Suelo-cemento granular
Suelo de fundación débil, k = 100 lb/pulg3
TPD actual = aproximadamente 600
Factor de proyección = 1.1

[12] Incluye paneles, camionetas pick up, y otros vehículos comerciales de dos ejes y cuatro llantas.

Tabla 8. Datos de Cargas por Ejes (Tabla W-4) para Estaciones Locales en un Estado del Medio-oeste*

Cargas por Eje (libras)	Camiones unidades simples					Tractor y Semi-trailer				Camión y trailer			2 unidades de trailer			Ejes por 1,000 vehículos**
	Panel y Pick up	Otros 2 ejes – 4 llantas	Otros 2 ejes – 6 llantas	3 ejes o más	Número de camiones simples	3 ejes	4 ejes	5 ejes o más	Número de Tractor-semitrailer	4 ejes	5 ejes	Número de Camión-Trailer	5 ejes	6 ejes o más	Número de 2 unidades de trailer	
EJES SIMPLES																
Debajo-3,000	200	39	17	--	1,967	--	--	--	--	11		103				1,014.2
3,000-6,999	48	29	130	6	1,088	--	4	3	42	12		109				607.1
7,000-7,999	--	1	21	5	123	--	--	--	--							60.3
8,000-11,999	1	1	40	12	256	1	2	7	66							157.8
12,000-15,999	--		18	5	109	2	1		41							73.5
16,000-17,999	--		5		22		--		--							10.8
18,000-18,500	1		2		18		--		--							8.8
18,501-19,999			2		9		--		--							4.4
20,000-21,999			3		13		1		7							9.8
22,000-23,999																
24,000-25,999																
26,000-29,999																
Total ejes simples ponderados	250	70	238	28	--	3	8	10	--	23		--				--
Total ejes simples contados	2,314	70	1,064	157	3,605	51	54	51	156	2,121		212				--

Cargas por Eje (libras)	Camiones unidades simples					Tractor y Semi-trailer				Camión y trailer			2 unidades de trailer			Ejes por 1,000 vehículos**
	Panel y Pick up	Otros 2 ejes – 4 llantas	Otros 2 ejes – 6 llantas	3 ejes o más	Número de camiones simples	3 ejes	4 ejes	5 ejes o más	Número de Tractor-semitrailer	4 ejes	5 ejes	Número de Camión-Trailer	5 ejes	6 ejes o más	Número de 2 unidades de trailer	
EJES TANDEM																
Debajo-6,000				--	--		--	--	--							--
6,000-11,999				2	11		--	4	21							15.7
12,000-17,999				8	45		2	6	44							43.6
18,000-23,999				5	28		1	3	22							24.5
24,000-29,999				3	17		--	2	10							13.2
30,000-31,999				1	5		--	1	5							4.9
32,000-32,500				--	--		--	1	5							2.4
32,501-33,999				3	17		--	1	5							10.7
34,000-35,999				2	5		--	1	5							7.8
36,000-37,999				3	--		--	--	--							8.3
38,000-39,999				1	17		--	--	--							2.9
40,000-41,999					11		1	1	12							5.9
42,000-43,999					6											
44,000-45,999																
46,000-49,999																
Total ejes Tándem ponderados				28	--		4	20	--							--
Total de ejes Tándem contados				157	157		27	102	129							--
Total de Vehículos contados***	1,157	35	532	157	1,881	17	27	51	95	66		66				

* Tabla W-4- (L) Número de cargas por eje de varias magnitudes de camiones cargados y vacíos, y combinaciones de camiones de cada tipo pesados y el número probable de tales cargas de cada tipo general, y de todos los tipos contados en 18 estaciones de pesaje durante el periodo del 15 de junio al 31 de agosto de 1964.

** Todas las unidades simples y combinaciones.

*** Total de unidades simples y de unidades-combinaciones = 2,042

Cálculos del Tráfico

TPD de diseño = 600 x 1.1 = 660
Factor de Fatiga asignado = 12 (como se muestra en la Tabla 5 para el rango mas alto del TPD para calles residenciales)

Espesor de Diseño

Para un valor de *k* = 100 lb/pulg3 y un Factor de Fatiga de 12, la Figura 3 muestra un espesor básico requerido para el suelo-cemento de alrededor de 5.9 pulgadas. Los espesores de superficie correspondientes varían de ¾ a 1 ½ pulgadas, como se muestra en la Tabla 7. Entonces, un diseño apropiado para construcción debería ser una capa de base de 6 pulgadas de suelo-cemento, con una superficie bituminosa de 1 pulgada de espesor.

Tabla 9. Cálculo típico para determinar la distribución de cargas por eje

Intervalo de Carga por eje* (miles de libras) (1)	Ejes por 1,000 camiones** (2)	Cargas por eje en el periodo de diseño*** (3)
Ejes simples		
20-22	9.8	9,000
18-20	13.2	12,100
16-18	10.8	9,900
14-16	36.7	33,800
12-14	36.8	33,800
10-12	78.9	72,600
Ejes Tándem		
40-42	5.9	5,400
38-40	2.9	2,700
36-38	8.3	7,600
34-36	7.8	7,200
32-34	13.1	12,000
30-32	4.9	4,500
28-30	4.4	4,000
26-28	4.4	4,000
24-26	4.4	4,000
22-24	8.1	7,500
20-22	8.2	7,500
18-20	8.2	7,500

* Cuando los intervalos en la Tabla W-4, Tabla 8, excede en 2,000 libras, se proporcionan dentro de los intervalos de 2,000 libras.

** Los valores para todas las unidades simples y combinaciones de la Tabla W-4.

*** Producto de 919,800 camiones por la columna (2) dividido entre 1000.

Tabla 10. Cálculos típicos para el Factor de Fatiga

Carga por Eje (miles de libras) (1)	Cargas por Eje en el Periodo de Diseño* (miles) (2)	Coeficientes de Consumo de Fatiga** (3)	Efectos de Fatiga*** (4)
Ejes Simples			
22	9.0	544.	4,900.
20	12.1	27.	327.
18	9.9	1.	10.
16	33.8	0.025	1.
Ejes Tándem			
42	5.4	41,400.	223,600.
40	2.7	8,650.	23,400.
38	7.6	1,690.	12,800.
36	7.2	305.	2,200.
34	12.0	50.4	600.
32	4.5	7.5	34.
30	4.0	1.0	4.
		Total Factor de Fatiga	**267,876 268,000**

* Número de la Tabla 9, columna (3) dividido por 1,000

** De la Tabla 6 para suelo-cemento granular

*** Producto de la columna (2) x la columna (3)